

сильным броскам линейного напряжения, которые превышают номинальное значение питающего напряжения 380 В. Такие перенапряжения способствуют ускоренному старению изоляции статора. Поэтому, для улучшения условий работы таких двигателей, целесообразно применить утолщённую изоляцию обмотки статора для повышения её устойчивости к электрическим перенапряжениям при одиночном пуске ВЭМ. Также необходимо принять меры по модернизации конструкции ВЭМ с целью повышения его устойчивости к тяжёлым динамическим режимам.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Кононенко Е.В., Кононенко К.Е., Кружков В.Г. Анализ работы асинхронных двигателей при несимметрии первичного напряжения // Известия вузов. Электромеханика. – №3. – 2000. – С.26–29.
2. Качан Ю.Г. Реализация модели асинхронного двигателя для условий некачественного питания // Вестник КДПУ имени Михаила Остроградского. – №3. – 2009. – С.150–153.
3. Анализ технического состояния электровозного парка по сети железных дорог России за 2008 год. – М: ИПЦ «Желдориздат», 2009.
4. Лопухина Е.М., Сомихина Г.С. Расчет асинхронных электродвигателей однофазного и трехфазного тока. – М. Л., Госэнергоиздат, 1961. – 312 с.
5. Курбасов А.С. Повышение работоспособности тяговых электрических машин. – М.: Транспорт, 1976. – 56 с.

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ ПАРАМЕТРОВ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРИВОДА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ**

*П.Р. Баранов*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, Томск

Электромагнитный привод имеет широкое применение в электротехнических комплексах: муфты, контакторы, приводы тормоза, клапанов и т.д. В данной статье основное внимание уделено электромагнитному приводу тормоза асинхронных электродвигателей. Указанные электродвигатели имеют общую конструкцию с дисковыми тормозными устройствами и являются одной из модификаций единой серии. В обозначении таких двигателей используется буква «Е» перед указанием климатического исполнения [1-2]. Двигатели с тормозом широко применяются в подъемно-транспортном машиностроении, станкостроении, автоматических технологических линиях и т.д.

Объединение в единой конструкции противоположных по назначению технических устройств «двигатель» и «тормоз» позволяет сократить габариты и

массу устройства по сравнению с комплексами, состоящих из отдельных конструкций двигателя и механического тормоза. При эксплуатации должно быть предусмотрено минимальное время их одновременной работы. Например, в момент пуска двигателя фрикционные диски тормоза какое-то время остаются замкнутыми, поэтому затягиваются разгон и пусковые токи, фрикционные поверхности подвергаются износу. Это приводит к дополнительному нагреву при частых пусках, снижению сроков между очередным обслуживанием тормоза. В то же время, если интервал времени между рабочими циклами двигателя и тормоза относительно высок, то это приведет к снижению технического уровня всего устройства, например, при отключении двигателя и задержке срабатывания тормоза может привести к неприемлемой просадке груза в грузоподъемном механизме, либо усложнение аварийной ситуации на обрабатывающем станке. Совершенным, с точки зрения эксплуатации, можно считать такой электродвигатель, в котором в момент подачи напряжения фрикционные поверхности начинают размыкаться, а при отключении – с началом момента торможения [3].

Целью данной работы является определение при проектировании такой области параметров электромагнитного привода тормоза, которые обеспечат увязку этих параметров с заданным быстродействием и конструкционным требованиям электродвигателя.

Растормаживающий электромагнит имеет бронированную конструкцию, которая обеспечивает минимум потока рассеяния и максимальное тяговое усилие. Обычно, растормаживающий электромагнит расположен между подшипниковым щитом и вентилятором [1-3]. Соотношение геометрических размеров сердечника и катушки в нем обусловлены требованиями конструкции базового электродвигателя. Как и электродвигатель, электромагнит имеет цилиндрическую форму, в центре и по краям расположены два полюса (рис. 1). Зависимость формы, габаритов и критериев оптимизации от конструкции базового электродвигателя [4] делают не приемлемыми рекомендации из области проектирования электромагнитов электрических аппаратов об оптимальном соотношении ширины и высоты устройства [5].

При выводе основных соотношений воспользуемся следующими известными допущениями [3-4, 6]: противодействующее усилие якоря постоянно на протяжении всего рабочего хода; распределение индукции в воздушном зазоре равномерно; потоки рассеяния и выпучивания отсутствуют. Погрешность от введения таких допущений будет незначительна, так как растормаживающий электромагнит выполняется короткоходовым, величина воздушного рабочего зазора  $\delta$  обычно изменяется в диапазоне от 0,5 до 1,5 мм, а наружный диаметр магнитопровода превышает 100 мм.

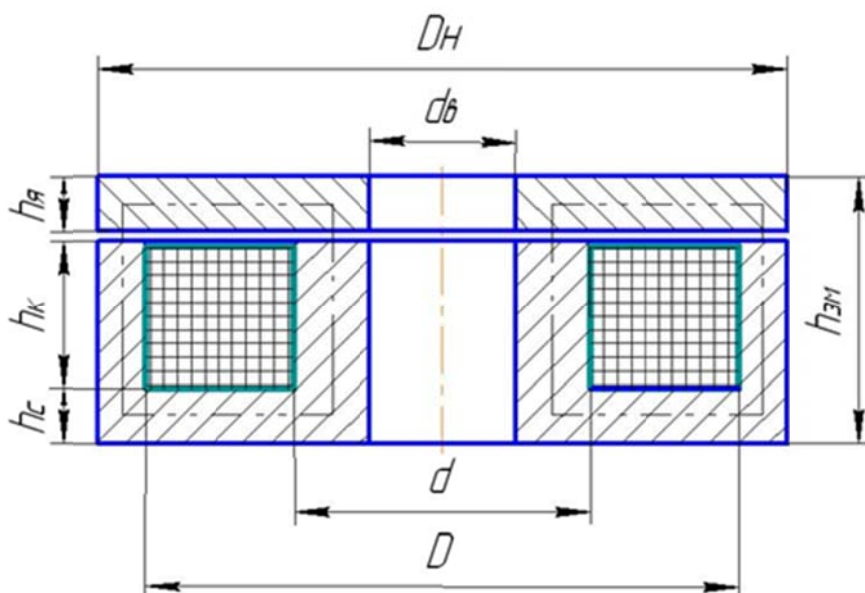


Рис. 1. Эскиз бронированной конструкции электромагнита

При проектировании необходимо для электромагнита и схемы управления определить реальные границы допустимых параметров, в области которых устройства обеспечат приемлемое решение и будет удовлетворять конструктивным и техническим ограничениям по унификации. Для этой цели проводится предварительная конструкторская проработка электродвигателя, в результате которой определяются область геометрических размеров электромагнита и его быстродействие (время трогания).

В результате проработки необходимо получить следующие данные: наружный диаметр магнитопровода  $D_n$  (рис. 1), минимальный внутренний диаметр  $d_b$ , максимальную осевую длину электромагнита  $h_{эм}$ , величину остаточного зазора  $\delta_0$ , материал магнитопровода, а также средний ток электромагнита в номинальном режиме  $I_y$ , обеспечивающий необходимую компактность полупроводниковых элементов схемы управления [9].

По результатам проектирования дискового тормоза для исходных данных проектирования будет известна величина противодействующего усилия возвратных пружин  $Q_{пр}$  [4].

Учитывая принятые допущения, используя формулу Максвелла для тягового усилия получим для известной индукции на полюсах  $B\delta$  величину площади одного полюса  $S_p$  [8]. При рациональном проектировании, площади наружного и внутреннего полюса электромагнита должны быть одинаковыми. По известным формулам, при известном значении  $S_p$ , легко определить размеры под катушку  $D$ ,  $d$ , среднюю длину витка обмотки  $l$  (рис. 1) [3]. По известной геометрии магнитопровода и индукции в воздушном зазоре  $B_\delta$  проводится традиционный расчет магнитной цепи в ходе которого для рабочего зазора  $\delta$  определяется величина МДС трогания электромагнита  $F_{тр}$ , а для остаточного зазора после срабатывания  $\delta_0$  определяется величина МДС удержания  $F_y$ , необходимой для удержания якоря в притянутом состоянии.

Принимая во внимание допущение об отсутствии потоков рассеяния в бронированной конструкции электромагнита можно записать:

$$\Phi_{\delta} w = L I_{mp}, \quad (1)$$

где  $\Phi_{\delta}$  – магнитный поток;

$w$  – число витков обмотки;

$L$  – индуктивность обмотки;

$I_{тр}$  – величина тока при котором начинается движения якоря (ток трогания).

Величина активного сопротивления обмотки определится по известной формуле:

$$R = \rho_{\theta} w l / s, \quad (2)$$

где  $\rho_{\theta}$  – удельное сопротивление материала обмоточного провода при рабочей температуре  $\theta$ ;

$l$  – средняя длина витка обмотки;

$s$  – сечение обмоточного провода.

Предварительно, число витков обмотки можно определить через известные МДС и ток удержания по формуле:

$$w = F_y - I_y, \quad (3)$$

Используя формулы (1)–(3) получим выражение для постоянной времени обмотки в момент трогания:

$$T = \frac{L}{R} = \frac{B_{\delta} S_{II} F_y s}{\rho_{\theta} l F_{mp} I_y}. \quad (4)$$

Полученные результаты расчетов в совокупности с напряжением питания достаточны для определения обмоточных параметров обмотки электромагнита, но эти результаты не отражают важнейшего показателя данного типа электромагнитов – быстродействия. Для учета этого показателя в методике расчетов рассмотрим динамику работы электромагнитного привода. В данной статье ограничимся анализом схем управления, обеспечивающих питание электромагнитов постоянным током.

При пуске и подачи постоянного напряжения  $U_k$  обмотке электромагнита и при условии ненасыщенной магнитной системы, значение тока в обмотке электромагнита в любой момент времени описывается следующим выражением [8]:

$$i(t) = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (5)$$

При известном времени трогания  $t_{тр}$  и величине просадки сети в момент включения  $k_c$  можно определить величину тока трогания, при этом токе сила электромагнитного притяжения равна противодействующей силе возвратных пружин электромагнита:

$$I_{mp} = \frac{k_c U}{R} \left( 1 - e^{-\frac{t_{mp}}{T}} \right) \quad (6)$$

Тогда величина магнитодвижущей силы (МДС) трогания определится по аналогии:

$$F_{mp} = \frac{k_c U w}{R} (1 - e^{-\frac{t_{mp}}{T}}) \quad (7)$$

Тогда с учетом (2) и (7) можно получить:

$$F_{mp} = \frac{k_c U s}{\rho_{\theta} l} \left( 1 - e^{-\frac{t_{mp}}{T}} \right). \quad (8)$$

Из полученной формулы (8) получим выражение для постоянной времени обмотки электромагнита, обеспечивающей заданное время трогания:

$$T = \frac{t_{mp}}{\ln \frac{k_c U s}{k_c U s - F_{mp} \rho_{\theta} l}}. \quad (9)$$

В полученном выражении (9) объединены следующие параметры: быстродействие, сечение обмоточного провода, напряжение, геометрические размеры обмотки, удельное сопротивление материала обмотки и электромагнитные характеристики, обеспечивающие величину тягового усилия. Анализ полученного выражения позволяет найти области соотношений этих параметров, при которых выполняется условие быстродействия и значения сечения обмоточного провода являются вещественными:

$$s > \frac{F_{mp} \rho_{\theta} l}{k_c U}. \quad (10)$$

В формуле (9) два неизвестных параметра:  $T$  – постоянная времени и  $s$  – сечение обмоточного провода. Ранее было получено выражение для постоянной времени  $T$ . С учетом (4) и (9) получим уравнение, содержащее одно неизвестное – сечение обмоточного провода обмотки:

$$\frac{B_{\delta} S_{\Pi} F_y s}{\rho_{\theta} l F_{mp} I_y} = \frac{t_{mp}}{\ln \frac{k_c U s}{k_c U s - F_{mp} \rho_{\theta} l}}. \quad (11)$$

Уравнение (11) относится к разряду трансцендентных, которые решений в общем виде не имеет. Поэтому возможны два способа решения уравнения (11) [7]: графический метод, либо численный метод, в котором с помощью специальных программ определяется неизвестное значение.

После определения величин  $s$  и  $T$  округляем сечение провода до ближайшего табличного значения  $s_{\text{т}}$ . Для уточнения числа витков получим соответствующую формулу с учетом (13) и (12):

$$w = \frac{T \rho_{\theta} l F_{mp}}{B_{\delta} S_n s_m}. \quad (12)$$

Полученные параметры – число витков и сечение провода обмотки обеспечит требуемое быстродействие электромагнита  $t_{\text{тр}}$ .

В качестве иллюстрации и наглядности на рис. 2 приведен пример графического расчета параметров обмотки электромагнитного привода тормоза асинхронного двигателя мощностью 15 кВт [8].

На нем представлены зависимости  $T_1 = f(s)$  и  $T_2 = f(s)$ , которые описывают левую и правую часть уравнения (11) соответственно. В точке их пересечения с координатами:  $T = 0,06$  с и  $s = 2,2$  мм<sup>2</sup> получаем искомые значения параметров электромагнита, обеспечивающие заданное быстродействие и расчетное тяговое усилие.

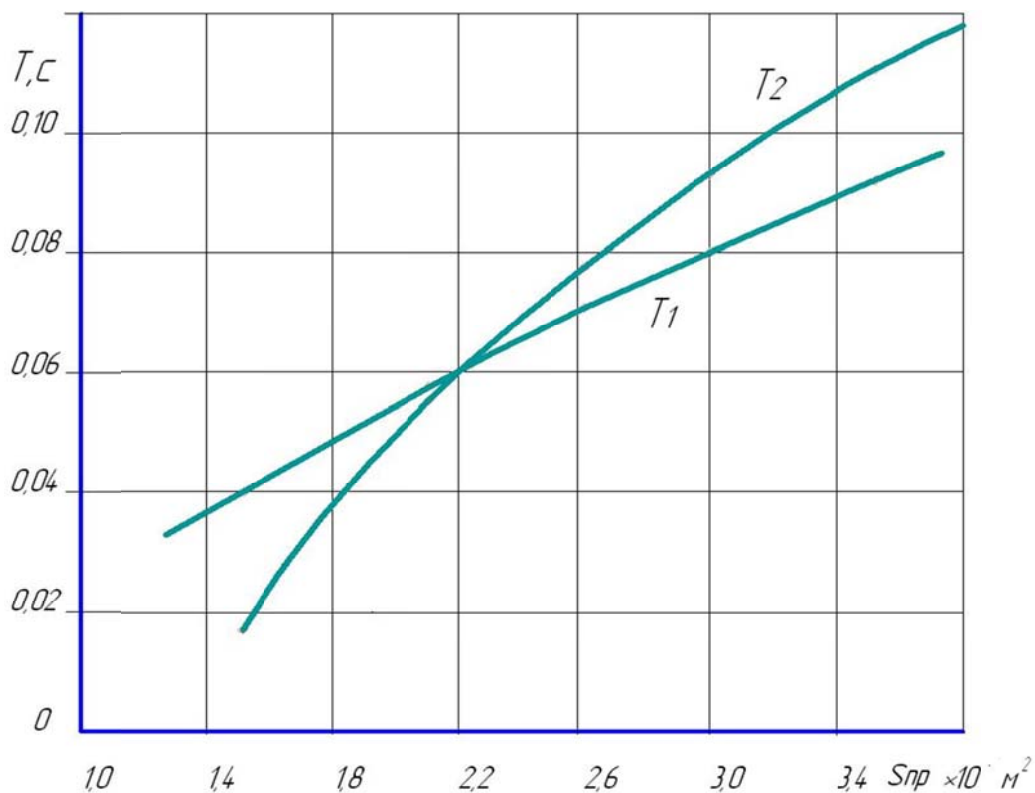


Рис. 2. Графическое определение сечения обмоточного провода электромагнита

Более точное и удобное решение таких уравнений обеспечивают программы MathCad, MatLab и другие прикладные программы.

После определения обмоточных параметров рассчитывается осевая высота обмотки  $h_k$  (рис. 1), размещается обмотка в окне сердечника, проводится оценка электромагнита на нагрев по известной методике [с] в зависимости от заданного режима работы.

### Выводы

1. Теоретическую основу методики расчета составляют выражения и рекомендации, полученные для расчета области параметров электромагнитного привода тормоза асинхронных двигателей при проектировании.
2. Получены выражения для определения области исходных данных и независимых переменных электромагнитного привода, удовлетворяющих при расчете электромагнитного привода требованиям быстродействия, тяговых характеристик и конструкции асинхронного двигателя.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Унифицированная серия асинхронных двигателей Интерэлектро // Радин В.И., Лондин Й., Розенкоп В.Д. и др.; Под ред. В.И. Радина. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 416 с.
2. Алиханян К.А. Проектирование асинхронных двигателей со встроенным электромагнитным тормозом // Электротехника. – 1984.- № 7. – С. 55-56.
3. Соленков В.В., Гринберг В.С., Гусельников Э.М. Расчет электромагнита с форсировкой для электродвигателей со встроенным тормозом

//Электрооборудование автоматизированных установок. – Томск: Изд-во ТГУ, 1980. – С. 59–63.

4. Гусельников Э.М., Цукерман Б.С. Самотормозящие электродвигатели. – М.: Энергия, 1971. – 96 с.

5. Сливинская А.Г. Электромагниты и постоянные магниты. - М.: Энергия, 1972.- 247с.

6. Баранов П.Р., Гринберг В.С. Выбор схемы включения двухобмоточного электромагнита // Электричество. – 1986. – № 4. – С. 47–49.

7. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – М.: Наука, 1986. – 544 с.

8. Баранов П. Р., Шараевский А. А. Расчет электромагнитного привода дисковых тормозных устройств асинхронных двигателей с заданным быстродействиемобразования // Интернет-журнал «Науковедение», 2013 №3 (16) [Электронный ресурс] – М.: Науковедение, 2013 – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/sbornik6/4.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ.

9. Баранов П. Р., Попов В. Ю. Новые конструкторские решения при создании электромагнитного привода тормозного устройства электродвигателей// Интернет-журнал «Науковедение», 2013 №3 (16) [Электронный ресурс] – М.: Науковедение, 2013. Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/sbornik6/4.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ДАТЧИКОМ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ**

*П.И. Кашин*

Акционерное общество «Научно-производственный центр «Полюс», Россия,  
Томск

В схемах автоматического контроля и измерения различных неэлектрических величин широко применяется их преобразование в какие-либо электрические сигналы. Подобное преобразование позволяет относительно просто осуществить передачу на расстояние и обработку результатов измерения. Однако часто процесс преобразования неэлектрической величины в электрическую осложняется необходимостью соблюдения ряда условий, связанных со спецификой осуществляемого измерения. Выполнение этих условий в некоторых случаях представляют собой задачу не менее сложную, чем сам процесс преобразования.

Так, перемещение исполнительного механизма может осуществляться с помощью электромагнитного линейного двигателя, а преобразование перемещения в электрический сигнал может обеспечиваться датчиком обратной связи [1].